

## EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BUFFER DE SUELOS ÁCIDOS DE LA REGIÓN PAMPEANA

DANIEL OSCAR BENNARDI<sup>1</sup>, AGUSTINA DÍAZ GOROSTEGUI<sup>1</sup>, LUCIANO JUAN<sup>1</sup>, GUILLERMO MILLAN<sup>1</sup>, ANDREA EDITH PELLEGRINI<sup>1</sup>, MABEL ELENA VÁZQUEZ<sup>1\*</sup>

Recibido: 24/06/2017

Recibido con revisiones: 13/03/2018

Aceptado: 22/03/2018

### RESUMEN

La capacidad buffer de un suelo puede ser utilizada para evaluaciones cuantitativas del requerimiento de correctores básicos. Hipótesis: la capacidad amortiguadora, alcalina y ácida de suelos ácidos de la región pampeana puede ser estimada mediante el pH actual, pH potencial, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), materia orgánica y textura, determinaciones rutinarias en laboratorios de análisis de suelos. Los objetivos fueron: i) evaluar la evolución del pH de diferentes suelos ácidos representativos de taxones de amplia difusión areal de la Región Pampeana, ante el agregado de dosis crecientes de álcali y ácido, y ii) desarrollar funciones que permitan la estimación de la dosis de corrector mediante propiedades edáficas de fácil determinación. Se seleccionaron nueve suelos bonaerenses y uno pampeano, a los que se les efectuaron evaluaciones fisicoquímicas, y sobre los que se llevaron a cabo curvas de titulación alcalina y de titulación ácida mediante el agregado de cantidades crecientes de KOH 0,2 M, y HNO<sub>3</sub> 0,2 M, respectivamente, regulando la fuerza iónica del medio. La evolución del pH de los suelos ácidos ensayados ante el agregado de álcali y de ácido se ajustó por medio de funciones de regresión lineal. Tanto las curvas de titulación alcalina como de titulación ácida señalan la existencia de suelos cuyo poder amortiguador pudieron agruparse en dos categorías. Los de mejor poder buffer fueron los de CIC mayor a 14 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, MO mayor a 30 g kg<sup>-1</sup>, arcilla superior a 200 g kg<sup>-1</sup>, limo superior a 310 g.kg<sup>-1</sup> y arena menor de 400 g kg<sup>-1</sup>. Las determinaciones de contenido de materia orgánica y arcilla, de rutina en laboratorios de análisis de suelos, pueden ser una herramienta simple para la toma de decisión acerca de la dosis a emplear en la práctica del encalado, a través de los modelos de regresión lineal multivariado, previa calibración en condiciones de campo.

**Palabras clave:** Encalado, materia orgánica, curva de titulación, regresión lineal multivariada.

## EVALUATION OF THE BUFFER CAPACITY OF ACID SOILS OF THE PAMPAS REGION

### ABSTRACT

Soil buffer capacity can be used for quantitative evaluations of the requirement of basic correctors. Hypothesis: The buffering capacity of acid soils of the Pampean region can be estimated by the current pH (1:2.5), potential pH, CEC (Cationic exchange capacity), organic matter (OM) and texture, routine determinations in soil analysis laboratories. The objectives were: i) evaluate the evolution of pH of different acid soils representative of the Pampas Region, with the addition of increasing doses of alkali and acid, and ii) develop functions that allow the estimation of the corrector dose by easy determination edaphic properties. Ten soils were selected. Physicochemical evaluations and alkaline and acid titration curves were carried out by the addition of increasing amounts of 0.2 M KOH and HNO<sub>3</sub> 0.2 M, respectively. pH evolution of acid soils tested against alkali and acid aggregation was adjusted by linear regression functions. Both alkaline titration and acid titration curves point to the existence of soils whose buffer capacity could be grouped into two categories. The ones with the best buffer capacity were those of CEC greater than 14 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, OM greater than 30 g kg<sup>-1</sup>, clay higher than 200 g kg<sup>-1</sup>, silt higher than 310 g kg<sup>-1</sup> and sand smaller than 400 g kg<sup>-1</sup>. Routine organic matter and clay content determinations in soil analysis laboratories may be a simple decision-making tool for the dose to be used in liming practice, using multivariate linear regression models, after calibration under field conditions.

**Key words:** Liming, organic matter, titration curve, multivariate linear regression.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales- UNLP

\* Autor de contacto: mvazquez@agro.unlp.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la acidificación de los suelos de las regiones templadas se ha acelerado debido a diversas actividades antropogénicas como la producción agropecuaria sin reposición de elementos básicos, deposición de elementos atmosféricos acidificantes provenientes de la actividad industrial y aplicación de fertilizantes nitrógenados amoniacales en dosis altas y crecientes (Burle *et al.*, 1997; Tang, 1998; Limousin & Tessier, 2007; Xu *et al.*, 2012). La reducción del pH trae como consecuencia deficiencias de nutrientes, entre ellos fósforo, molibdeno, calcio y magnesio, y cuando los valores descienden por debajo de 5,3-5,5, comienzan a manifestarse toxicidades de aluminio y manganeso en las plantas, especialmente cuando los materiales originales son ricos en estos elementos (Oorts *et al.*, 2004; Millán *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2012).

La capacidad reguladora o buffer de un suelo se define como la cantidad de ácido o base necesaria para cambiar su pH en una unidad (Sá Mendonça *et al.*, 2006). También se la considera como la resistencia que tiene el suelo a cambiar el pH cuando se le adicionan sustancias ácidas o básicas. Esta propiedad se debe a la habilidad de los pares conjugados ácido-base presentes, de transferir protones entre ellos; pares que pueden estar tanto en la solución como en los sólidos edáficos (Zapata Hernández, 2004; Van Rensburg *et al.*, 2009). Esta condición es un factor clave para determinar la dinámica de la acidificación y, por ende, la necesidad y características técnicas de los tratamientos correctivos a emplear. Puede ser utilizada para evaluaciones cuantitativas del requerimiento de correctores básicos, mayor capacidad buffer indica mayor cantidad de enmienda necesaria para neutralizar la acidez del suelo bajo similares valores de pH actual (Xu *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015).

Este poder amortiguador depende del contenido y tipo de acidez, presencia de sales, cantidad y tipo de arcillas y materia orgánica, y del pH inicial que tiene el suelo (Zapata Hernández, 2004; Van Rensburg *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2015). La capacidad buffer se incrementa, entre otros factores, con el aumento de la valencia de los cationes y la fuerza ióni-

ca de la solución edáfica. Las arcillas de tipo 2:1 tienen una gran capacidad para adsorber o ceder protones, mientras que en las de tipo 1:1 como la caolinita sucede lo contrario (Xu *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015). Con respecto a la materia orgánica, los grupos funcionales ácidos débiles pueden actuar, asimismo, como pares conjugados ácido-base, otorgándole una alta capacidad amortiguadora al suelo. La diversidad de estos grupos (carboxílicos, fenólicos y otros) provee a la materia orgánica la posibilidad de actuar como un buffer en un amplio rango de pH (Zapata Hernández, 2004; Van Rensburg *et al.*, 2009).

Existen diversas metodologías para determinar la capacidad amortiguadora del suelo. Entre ellas pueden citarse aquellas que se basan en el empleo de soluciones buffer (Shoemaker *et al.*, 1961; Machacha, 2004; Sikora, 2012), el método del hidrógeno de cambio (Conti *et al.*, 1983), técnicas electrocinéticas (Vázquez *et al.*, 2007; Vázquez *et al.*, 2008) y curvas de titulación (Sakala *et al.*, 2004; Sá Mendonça *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2009; Nelson & Su, 2010; Xu *et al.*, 2012; Kissel *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2015; Sokolova *et al.*, 2016). Estas últimas describen los valores de pH alcanzados con cantidades crecientes de álcali o ácido agregadas a una suspensión de suelo. Las curvas de titulación básica pueden ser utilizadas para determinar el requerimiento de correctores básicos de cada tipo de suelo, mientras que las curvas de titulación ácida podrían permitir conocer la velocidad o evolución de la acidificación, por ejemplo, posterior al encalado (Wang *et al.*, 2015).

Ante la necesidad de desarrollar sistemas confiables de diagnóstico y tratamiento de suelos acidificados de la Región Pampeana argentina, se plantea como hipótesis: la capacidad amortiguadora, alcalina y ácida de suelos ácidos de la región pampeana puede ser estimada mediante el pH actual, pH potencial, CIC, materia orgánica y textura, determinaciones rutinarias en laboratorios de análisis de suelos. Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar la evolución del pH de diferentes suelos ácidos representativos de taxones de amplia difusión areal de la Región Pampeana, ante el agregado de dosis crecientes de álcali

y ácido, y ii) desarrollar funciones que permitan la estimación de la dosis de corrector mediante propiedades edáficas de fácil determinación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**a) Suelos:** Se seleccionaron 10 suelos ácidos de diferentes ámbitos de la región pampeana, caracterizados por representar diferentes taxones de importante difusión areal, propiciando la participación de condiciones texturales distintas. Los mismos fueron muestreados de 0-20 cm mediante una muestra compuesta de 10 submuestras/muestra sobre superficies de 50 ha. Las muestras, previamente secadas a 40°C con circulación forzada, fueron tamizadas según protocolo SAMLA, (SAGPyA, 2004).

Los suelos pertenecen a las siguientes series, taxones y localidades: Norumbega (Hapludol típico, Carlos Casares); Bolívar (Hapludol éntico, Bolívar); Rivadavia (Hapludol éntico, González Moreno); Norumbega (Hapludol éntico, 25 de Mayo); Magdalena (Argiudol típico, Verónica); Bombeador (Argiudol típico, Los Hornos); Bolívar (Hapludol típico, Norberto de la Riestra); Ortiz de Rozas (Hapludol tapthoárgico, Lincoln); Magdalena (Argiudol típico, Bavio); Udaondo (Argiudol abráptico, Gral. Belgrano).

**b) Evaluaciones químicas y fisicoquímicas:** se hicieron determinaciones de materia orgánica (MO) por dicromatometría (Walkley y Black modificado), pH actual (suelo:agua 1:2,5) y potencial (suelo:KCl 1:2,5) por método potenciométrico, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y Ca y Mg intercambiables mediante extracción por el método de acetato de amonio 1N pH 7, determinación de CIC por destilación Kjeldahl y cationes por quelatometría, y textura por densimetría de Bouyoucus, todo según protocolos SAMLA (SAGPyA, 2004).

**c) Curvas de titulación:** para cada suelo se llevaron a cabo dos curvas. En una se efectuaron agregados crecientes de álcali hasta alcanzar un valor de pH de 7. En la otra curva, previamente se adicionó álcali con el fin de elevar el pH del suelo al valor máximo alcanzado en la curva anterior, para luego agregar cantidades crecientes de ácido.

*Curva de titulación alcalina* (Sadzawka *et al.*, 2006): para cada punto de la curva se pesaron 10 g de suelo en frascos de plástico de 100 ml, a las que se agregaron volúmenes crecientes de una solución de KOH/KCl (0,2 M en KOH y 1 M en KCl). Luego se añadieron volúmenes variables de una solución de KCl 1 M con el fin de igualar los volúmenes y la concentración de KCl en todas las porciones de suelo, minimizando así las variaciones en fuerza iónica. Se adicionaron dos gotas de cloroformo para inhibir la actividad de los microorganismos que podrían modificar la condición de pH (Xu *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015), se mezcló manualmente se taparon los frascos para posterior incubación en estufa a 60 °C durante 24 horas. Posteriormente se agregaron 15 ml de solución de KCl 1 M, se agitó durante una hora a temperatura ambiente en un agitador vaivén. Luego se efectuó la determinación potenciométrica del pH.

*Curva de titulación ácida:* para cada punto de la curva se pesaron 10 g de suelo en frascos de plástico de 100 ml a las que se agregó solución de KOH/KCl (0,2 M en KOH y 1 M en KCl) con el fin de alcanzar el valor de pH máximo obtenido en la curva de titulación alcalina. Se adicionaron dos gotas de cloroformo, se mezcló manualmente y se taparon los frascos, incubándolos en estufa a 60 °C durante 24 horas (condiciones comparables a las utilizadas en la curva de titulación alcalina). A continuación se añadieron cantidades crecientes de una solución de HNO<sub>3</sub>/KCl (HNO<sub>3</sub> 0,2 M y KCl 1M) y volúmenes variables de una solución de KCl 1 M a fin de igualar los volúmenes y la concentración de KCl en todas las porciones de suelo. Nuevamente se adicionaron dos gotas de cloroformo, se mezcló y taparon los frascos, incubándolos en estufa a 60 °C por un lapso de 7 días. Tras este período se procedió a la medición del pH.

**d) Evaluación estadística:** se efectuó un análisis de regresión lineal y no lineal de las curvas de titulación alcalina y ácida con las correspondientes pruebas de significancia de los modelos que se obtuvieron a los fines de seleccionar la función de mejor ajuste. Se compararon las pendientes de las curvas entre suelos (curvas de titulación ácida y de titulación alcalina por separado) y dentro de cada suelo (curva de titulación ácida vs curva

de titulación alcalina), mediante un análisis de la varianza de modelos múltiples. Se obtuvieron regresiones múltiples de la variable dependiente “pendiente de la regresión lineal de la curva de titulación”, utilizando distintas variables edáficas como independientes (CIC, pH actual, pH potencial, MO y contenido de arcilla), mediante el método regresión por pasos (stepwise). Se procedió a la selección del mejor modelo de regresión lineal multivariado utilizando el criterio del coeficiente de determinación  $R^2$  (ajustado por número de variables del modelo), significancia de los coeficientes de regresión parciales y valor del Cp de Mallows. Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2011).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis de los suelos empleados se presentan en la **Tabla 1**. Los suelos poseían pH actual entre 5,27 y 6,03, y pH potencial entre 4,62 y 5,04. Los valores alcanzados por la CIC fueron de 7,6 a 22,5  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , mientras que el contenido de MO tuvo un rango de 10,6 a 53,7  $\text{g kg}^{-1}$ . Las clases texturales estuvieron comprendidas entre franco-arcilloso y franco-arenoso. Todas estas propiedades muestran la variabilidad de la población analizada.

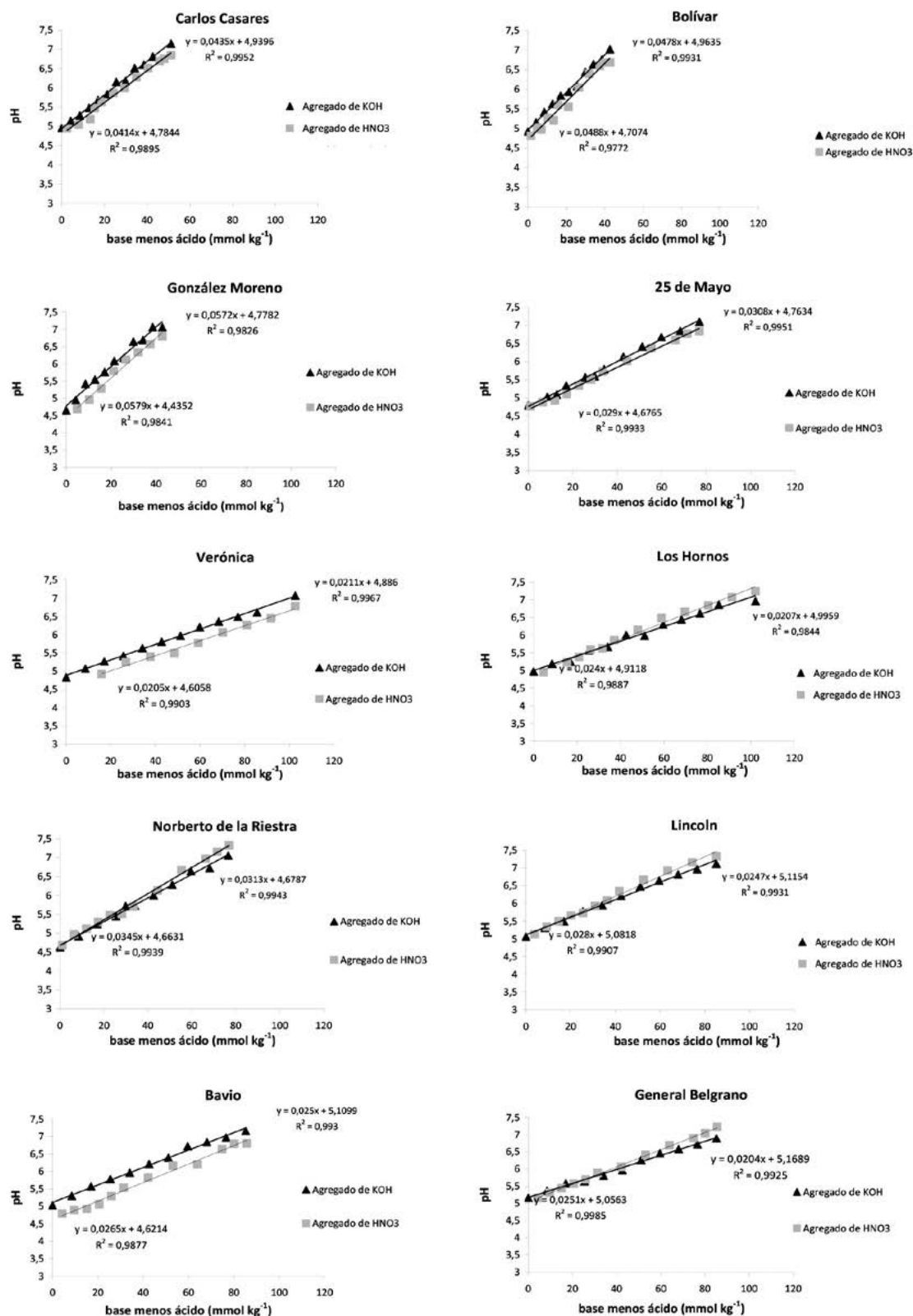
En la **Figura 1** se ilustran las curvas de titulación (básica y ácida) obtenidas. Como puede apreciarse en ellas los cambios de pH son paulatinos a través de todo el rango estudiado, entre valores de pH cercanos a 5 y 7. Esto se diferencia de lo que se observa en los diagramas característicos de ácidos polipróticos, donde se aprecian mesetas, alternando con pendientes pronunciadas (Zapata Hernández, 2004; Van Rensburg *et al.*, 2009). Cuando se adiciona una base a un suelo, se neutralizan las diferentes fuentes responsables de la acidez: óxidos, oxihidróxidos de Al y Fe, arcillas, grupos funcionales de la materia orgánica como carboxilos e hidroxilos fenólicos (Sokolova *et al.*, 2016). Cada una de estas fuentes de protones está asociada a una constante de acidez ( $K_a$ ), y dada la cercanía de los valores de éstas, pueden existir casos en que las curvas no presenten cambios bruscos de pendiente cuando se pasa de una fuente de protones a otra. La variabilidad de fuentes de protones en los Molisoles analizados caracterizados por materia orgánica de alto grado de humificación, junto con la variabilidad mineralógica (Terugi, 1957) podría ser la responsable de la forma de las curvas obtenidas.

Puede observarse que ambos tipos de curvas se comportan linealmente en todo el rango de trabajo. Este hecho ha sido comprobado por otros

**Tabla 1.** Características generales de los suelos ensayados. Referencias: a: arcilla, L: limo, A: arena, Clase textural: Fr: franco, A: arenoso, a: arcilloso, L: limoso. CV: coeficiente de variación.

**Table 1.** General characteristics of the tested soils. References: a: clay, L: silt, A: sand, Textural class: Fr: loam, A: sandy, a: clay, L: silty. VC: variability coefficient.

SUELO	pH actual	pH potencial	CIC	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	MO	a	L	A	Clase textural
				$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$			$\text{g kg}^{-1}$			
Carlos Casares	5,82	4,98	10,8	6,7	0,9	28,7	200	280	520	Fr-A-a
González Moreno	6,03	4,67	7,6	3,7	0,8	10,6	160	120	720	Fr-A
Bolívar	5,90	4,83	9,1	5,1	1,5	22,5	180	100	720	Fr-A
25 de Mayo	5,35	4,70	14,4	7,1	1,7	38,6	250	390	360	Fr
Verónica	5,98	4,86	17,5	10,5	1,6	53,7	220	500	280	Fr
Los Homos	5,90	4,99	18,2	12,6	2,9	37,6	270	510	220	Fr-a
Norberto de la Riestra	5,27	4,62	12,9	7,0	0,8	30,0	200	200	600	Fr-A
Lincoln	5,76	4,95	16,3	9,9	1,6	35,0	290	310	400	Fr
Bavio	5,77	4,76	22,5	15,4	2,6	36,2	300	520	180	Fr-L-a
Belgrano	5,79	5,04	16,4	11,6	1,3	50,0	200	480	320	Fr
CV (%)	5,7	3,1	30,2	39,2	42,7	37,1	23,4	48,8	44	



**Figura 1.** Curvas de titulación de los suelos estudiados.  $R^2$ : coeficiente de determinación. Abscisa: en la curva alcalina se consignan los mmoles de KOH agregados por kg suelo y en la curva ácida los mmoles de KOH por kg de suelo – los mmoles de  $\text{HNO}_3$  por kg de suelo.

**Figure 1.** Studied soils titration curves.  $R^2$ : determination coefficient. Abscisa: the alkaline curve shows the added mmoles of KOH per soil kg and the acid one the difference between added mmoles of KOH and  $\text{HNO}_3$  per soil kg.



investigadores (Sá Mendonça *et al.*, 2006; Van Rensburg *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2012). Para cada caso se analizaron diferentes funciones de ajuste a través de regresión lineal y no lineal (**Tabla 2**). Debido a que la diferencia entre el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del modelo no lineal (de mayor  $R^2$ ) y el de la función lineal fue pequeña en todos los casos y como el modelo no lineal no fue el mismo para todos los suelos, se optó por ajustar con regresiones de tipo lineal. Esto permitió, además, comparar las pendientes para establecer tipologías de suelos y posibilidad de tratamiento.

Se ajustó así la correspondiente expresión  $y = a + bx$ , donde  $y = \text{pH}$ ,  $x = \text{mmoles de base menos mmoles de ácido agregado por kg de suelo (correspondiendo en la curva alcalina sólo el agregado de base)}$ , y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Como puede verse en la **Figura 1**, para el caso de las curvas de titulación alcalina los coeficientes de determinación estuvieron comprendidos entre

0,982 y 0,996, mientras que para las curvas de titulación ácida oscilaron entre 0,977 y 0,998; demostrando las bondades del ajuste lineal.

Las pendientes “b” correspondientes a las funciones obtenidas para ambos tipos de curvas arrojaron valores desde 0,020 a 0,057 unidades de  $\text{pH kg mmoles}^{-1}$ . Cuando se analizan estadísticamente las diferencias para cada suelo entre las pendientes de la curva alcalina y ácida, en seis de los diez suelos (C. Casares, Bolívar, G. Moreno, 25 de Mayo, Verónica y Bavio) no existen diferencias estadísticamente significativas. En los cuatro casos en la que sí existe diferencia (Los Hornos, Norberto de la Riestra, Lincoln y Gral. Belgrano), puede apreciarse en la **Figura 1**, que se trata de variaciones de poca trascendencia desde el punto de vista práctico. Considerando que la recíproca de “b” es la capacidad buffer del suelo (Xu *et al.*, 2012), se observa en todos los casos que el poder regulador alcalino es similar al ácido. Los suelos estudiados se caracterizan por poseer arcillas de

**Tabla 2.** Comparación de modelos lineales y no lineales (de mayor  $R^2$ ) en curvas de titulación alcalina y ácida.

**Table 2.** Linear and nonlinear models (of higher  $R^2$ ) comparison in acid and alkaline titration curves.

Suelo	Alcalina		Ácida	
	Modelo	$R^2$ (%)	Modelo	$R^2$ (%)
Carlos Casares	Lineal	99,52	Lineal	98,95
	Raíz Cuadrada de Y	99,43	Cuadrado de Y	99,16
Bolívar	Lineal	99,31	Lineal	97,72
	Raíz Cuadrada de Y	99,20	Raíz Cuadrada de Y	97,68
González Moreno	Lineal	98,26	Lineal	98,41
	Cuadrado de Y	98,66	Cuadrado de Y	99,08
25 de Mayo	Lineal	99,51	Lineal	99,33
	Raíz Cuadrada de Y	99,40	Cuadrado de Y	99,41
Verónica	Lineal	99,67	Lineal	99,03
	Cuadrado de Y	99,61	Exponencial	99,17
Los Hornos	Lineal	98,44	Lineal	98,87
	Cuadrado de Y	98,63	Cuadrado de Y	99,49
Norberto de la Riestra	Lineal	99,43	Lineal	99,39
	Cuadrado de Y	99,42	Raíz Cuadrada de Y	99,45
Lincoln	Lineal	99,31	Lineal	99,07
	Cuadrado de Y	99,68	Cuadrado de Y	99,39
Bavio	Lineal	99,30	Lineal	98,77
	Cuadrado de Y	99,63	Cuadrado de Y	98,83
Gral. Belgrano	Lineal	99,25	Lineal	99,85
	Raíz Cuadrada de Y	99,24	Lineal	98,95

tipo 2:1, fundamentalmente illita y montmorillonita, y materia orgánica con abundancia de ácidos húmicos y fúlvicos, lo que confiere a estos suelos amplias fuentes de variabilidad cuali y cuantitativa del poder amortiguador. La concordancia de la pendiente de ambas curvas señalaría que estas fuentes no serían afectadas por los cambios de pH o estarían compensando sus efectos.

Se efectuó una comparación de las pendientes “b” de cada tipo de curva entre suelos mediante un análisis de la varianza de modelos múltiples empleando variables dummy (**Tablas 3**).

**Tabla 3.** Pares de suelos cuyas pendientes “b” no tienen diferencias estadísticas significativas en las curvas de titulación alcalina y ácida, con nivel de confianza  $p < 0,05$ .

**Table 3.** Soil pairs whose “b” slopes do not have significant statistical differences in the titration curves alkaline and acid, with confidence level  $p < 0,05$ .

Curvas de titulación alcalina	Curvas de titulación ácida
25 de Mayo-Norberto de la Riestra	25 de Mayo-Lincoln
Los Hornos-Belgrano	Los Hornos-Belgrano
Lincoln-Bavio	Lincoln-Bavio
Verónica-Belgrano	Bavio-Belgrano
Verónica-Los Hornos	

Los resultados de la **Tabla 3** no permiten hacer una asociación estricta de la pendiente “b”. Sin embargo si se toma un punto de inflexión en el valor promedio de las pendientes (curvas alcalinas y ácidas),  $b = 0,030$  unidades de pH kg mmoles<sup>-1</sup>, los suelos con valores de pendiente “b” de ambas curvas  $< 0,030$  (25 de Mayo, Verónica, Los Hornos, Lincoln, Bavio y Gral. Belgrano) y, por lo tanto mayor capacidad buffer alcalina y ácida, son aquellos que, de acuerdo a la Tabla 1, tienen valores de CIC por encima de 14 cmolc kg<sup>-1</sup>; contenidos de MO mayor a 30 g kg<sup>-1</sup>, y de arcilla (a) y limo (L) superiores a 200 y 310 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Mientras que el contenido de arena en dichos suelos es inferior a 400 g kg<sup>-1</sup>. Estos suelos poseen una clase textural Fr, Fr-a o Fr-L-a, quedando fuera de la condición los suelos F-A. Estos resultados permitirían agrupar los suelos en dos grandes categorías de capacidad buffer, explicada ésta por la condición textural y las variables mencionadas.

Para el caso del encalado con CaCO<sub>3</sub>, si se plantea la situación de una capa arable de 2.000

Mg ha<sup>-1</sup>, un suelo con una pendiente “b” de 0,020 unidades de pH kg mmoles<sup>-1</sup>, es decir alta capacidad buffer, para provocar, por ejemplo, un aumento de 0,5 unidades de pH, considerando que 2 mmoles de KOH son equivalentes a 1 mmol de CaCO<sub>3</sub>, serían necesarios 2.500 kg de enmienda. Esta cuenta es aproximada, pues no tiene en cuenta, por razones de trabajarse en suspensiones en ausencia de actividad microbiana, otros aspectos secundarios de la práctica. Por ejemplo, acidez o alcalinidad producida por procesos biológicos en el campo (Wang *et al.*, 2015), la disolución de las enmiendas, o eventualmente, el aumento de la impedancia mecánica cuando se superan dosis en general de 1.500 kg ha<sup>-1</sup>, comprobados para suelos de esta región por otros autores, posiblemente por recristalizaciones del CaCO<sub>3</sub> (Vázquez *et al.*, 2009). Sin embargo, este procedimiento simple permitiría estimar la magnitud de la cantidad necesaria de corrector, cuando el objetivo es el incremento de pH. Es menester, por los argumentos citados, que este cálculo teórico sea calibrado con experiencias en condiciones reales, donde, además, se tengan en consideración estos otros efectos secundarios. Paralelamente, este cálculo demostraría que aún en suelos de alta capacidad buffer de la región, las dosis requeridas son sustancialmente menores que las empleadas en ámbitos subtropicales/tropicales, (3,5 Mg/ha de CaCO<sub>3</sub> en Oxisoles de Brasil, Espinosa & Molina, 1999).

A los fines de facilitar el diagnóstico a través de análisis de rutina en los laboratorios, se procedió a la selección del mejor modelo de regresión lineal multivariado que relacione la pendiente “b” de las curvas de titulación con las distintas propiedades edáficas (CIC, pH actual, pH potencial, MO y contenido de arcilla) de determinación sencilla y habitual. Se utilizó el criterio del coeficiente de determinación R<sup>2</sup> (ajustado por número de variables del modelo), significancia de los coeficientes de regresión parciales y valor del Cp de Mallows. Para el caso de la capacidad buffer alcalina el mejor modelo obtenido fue:

$$b = 0,0813 - 0,0007 MO (g kg^{-1}) - 0,0001a (g kg^{-1})$$

$$R^2 = 89,10 \%$$

El modelo permite constatar la incidencia de la MO y del contenido de arcilla. Sin embargo, la MO presenta un mayor coeficiente de variación que esta última (**Tabla 1**). Dado el proceso de agriculturización de las últimas décadas de esta región, y en particular la difusión del cultivo de soja (*Glycine max* L Merr), los contenidos de MO han disminuido considerablemente (Montico & Di Leo, 2011; Duval *et al.*, 2015). De manera que sería ésta la variable que desde el punto de vista práctico estaría condicionando el proceso de acidificación y la necesidad de corrector. A título de ejemplo, si consideramos un aumento de 20 a 30 g kg<sup>-1</sup> de MO, a igualdad de contenido de arcilla, por ejemplo 208,5 g kg<sup>-1</sup> (que es el valor promedio de los suelos estudiados para esta variable), significaría que la pendiente "b" pase de 0,045 a 0,037 unidades de pH kg mmoles<sup>-1</sup>. Si se repitiera el cálculo para elevar 0,5 unidades de pH de una capa arable de 2.000 Mg ha<sup>-1</sup>, ésto significaría tener que incrementar la dosis teórica de CaCO<sub>3</sub> de 1.111 a 1.351 kg ha<sup>-1</sup>.

Para el caso de la capacidad buffer ácida el mejor modelo obtenido fue:

$$b = 0,0805 - 0,000731 \text{ MO (g kg}^{-1}\text{)} - 0,000097 \text{ a (g kg}^{-1}\text{)}$$

$$R^2 = 95,93 \%$$

El modelo que explica la pendiente de las curvas ácidas incluye a las mismas variables independientes que la curva alcalina. Los elevados coeficientes de determinación general de ambos modelos propuestos, la significancia estadística de los coeficientes parciales y la sencillez de la determinación de las variables independientes incluidas en ellos, sugieren que su empleo puede ser de ayuda en la toma de decisión de la dosis de enmienda a aplicar y la periodicidad de la práctica del encalado en suelos del ámbito templado argentino.

## CONCLUSIONES

La evolución del pH de los suelos ácidos de la Región Pampeana argentina ensayados ante el agregado de álcali y de ácido se ajustó significa-

tivamente por medio de funciones de regresión lineal en todos los casos estudiados.

Considerando que la recíproca de la pendiente de cada curva alcalina y ácida es la capacidad buffer del suelo, se observó en todos los casos estudiados que el poder regulador alcalino es similar al ácido.

Los suelos de mejor poder buffer fueron (dentro de los 10 suelos estudiados) los de CIC mayor a 14 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, con MO mayor a 30 g kg<sup>-1</sup>, arcilla superior a 200 g kg<sup>-1</sup>, limo superior a 310 g kg<sup>-1</sup> y arena menor de 400 g kg<sup>-1</sup>.

Las determinaciones de contenido de materia orgánica y arcilla, de rutina en laboratorios de análisis de suelos, pueden ser una herramienta simple para la toma de decisión acerca de la dosis a emplear en la práctica del encalado, a través de los modelos de regresión lineal multivariado, previa calibración en condiciones de campo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Burle, ML; A Mielniczuck & S Focchi. 1997. Effect of cropping systems on soils chemical characteristics, with emphasis in soil acidification. *Plant Soil* 190:309-316.
- Conti, M; G Maccarini & M González. 1983. Método rápido de corrección de suelos ácidos. *Ci. Suelo (Argentina)* 1:15-20.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Software Estadístico. Versión Libre. [En línea] Available at: <http://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=46> [Último acceso: 13 9 2017].
- Duval, ME; J Capurro; J Galantini & J Andriani. 2015. Utilización de cultivos de cobertura en monocultivo de soja: efectos sobre el balance hídrico y orgánico. *Ci. Suelo (Argentina)* 33 (2): 247-261.
- Espinosa, J & E Molina. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Primera edición. IPNI. 42 p.
- Huang, P; J Zhang; A Zhu & C Zhang. 2009. Acid and Alkali Buffer Capacity of Typical Fluvo-Aquic Soil in Huang-Huai-Hai Plain. *Agricultural Sciences in China* 8:1378-1383.
- Kissel, D; R Isaac; R Hitchcock; L Sonon & P Vendrell. 2007. Implementation of soil lime requirement by a single-addition titration method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38:1341-1352.



- Limousin, G & D Tessier. 2007. Effects of no-tillage on chemical gradients and topsoil acidification. *Soil & Tillage Research* 92:167-174.
- Machacha S. 2004. Comparison of laboratory pH buffer methods for predicting lime requirement for acidic soils of eastern Botswana. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35:2675-2687.
- Millán, G; M Vázquez; A Terminiello & D Santos Sbuscio. 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana. *Ci Suelo (Argentina)* 28:131-140.
- Montico S & N Di Leo. 2011. Sustentabilidad de diferentes modelos de uso de la tierra en unidades de paisaje de una cuenca del Sur de Santa Fe, Argentina. *Natura neotropicalis* 42 (1 y 2): 21-33.
- Nelson, P & N Su. 2010. Soil pH buffering capacity: A descriptive function and its application to some acidic tropical soils. *Australian Journal of Soil Research*, 48:201-207.
- Oorts, K; B Vanlauwe; J Pleysier & R Merckx. 2004. A new method for the simultaneous measurement of pH-dependent cation exchange capacity and pH buffering capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1578-1585.
- Sá Mendonça, E; D Rowell & A Martins da Silva. 2006. Effect of pH on the development of acidic sites in clayey and sandy loam Oxisol from the Cerrado Region, Brasil. *Geoderma* 132:131-142.
- Sadzawka, AR; M Carrasco; R Grez; M Mora; H Flores & A Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Serie Actas INIA N°34. Chile.
- SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina). Dirección de Producción Agrícola. 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos (SAML). Versión Electrónica. ISBN 987-9184-40-8.
- Sakala, G; D Rowell & C Pilbeam. 2004. Acid-base reactions between an acidic soil and plant residues. *Geoderma* 123:219-232.
- Sikora F. 2012. Double-buffer methods revisited with focus on ionic strength and soil/solution ratio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76:718-732.
- Shoemaker, HE; EO McLean & PF Pratt. 1961. Buffer methods of determining lime requirements of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25:274-277
- Sokolova, TA; I Tolpeshta & E Rusakova. 2016. Contributions of separate reactions to the acid-base buffering of soils in brook floodplains (Central Forest State Reserve). *Eurasian Soil Sci.* 49:399-411.
- Tang C. 1998. Factors affecting soil acidification under legumes I. Effect of potassium supply. *Plant Soil* 199:275-282.
- Teruggi, M. 1957. The nature and origin of Argentine loess. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 322-332.
- Van Rensburg, H; A Claassens & D Beukes. 2009. Relationships between soil buffer capacity and selected soil properties in a resource-poor farming area in the Mpumalanga Province of South Africa. *South African Journal of Plant and Soil* 26:237-243.
- Vázquez, M; F Hernández-Luis; D Benjumea; D Grandoso; M Lemus & C Arbelo. 2007. Electrokinetic determination of the buffer capacity of Andisols. *Science of the Total Environment* 378:214-217.
- Vázquez, M; D Vasco & F Hernández-Luis. 2008. Effect of time and electrical potential gradient on the buffer capacity of soils, as measured using an electrokinetic method. *Land Contamination and Reclamation* 16:249-260.
- Vázquez, M; A Terminiello; A Duhour; M García & F Guilino. 2009. Efecto de correctores de acidez sobre las propiedades físicas de un Argiudol típico de la pradera pampeana. *Ci Suelo (Argentina)* 27:67-76.
- Wang, X; C Tang; S Mahony; JA Baldock & CR Butterly. 2015. Factors affecting the measurement of soil pH buffer capacity: approaches to optimize the methods. *European Journal of Soil Science* 66:53-64.
- Xu, R; A Zhao; J Yuan & J Jiang. 2012. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars. *J Soils Sediments* 12:494-502.
- Zapata Hernández, R. 2004. Química de la acidez del suelo. Cali, Colombia. ISBN 958-33-6712-5. 208 p.